

Mg-Zn-Sn 铸造合金的组织及力学性能

杨珏^{1,2} 胡剑² 张诗昌^{1,2}

(1.武汉科技大学钢铁冶金及资源利用省部共建教育部重点实验室; 2.武汉科技大学材料与冶金学院)

摘要 通过改变 Zn、Sn 含量,采用金属型铸造了 Mg-Zn-Sn 合金,研究了其铸态组织及力学性能。结果表明,在 Zn、Sn 总含量 $\leq 6\%$ 时,随着元素含量增加,Mg-Zn-Sn 合金的组织由柱状晶向等轴晶转变,且等轴晶晶粒尺寸和二次枝晶间距减小,原因是生长限制因子 G_{RF} 值随着元素含量增加而增大;而第二相 MgZn 及(或) Mg_2Sn 数量则随元素含量增加而增加;屈服强度及压缩强度随 Zn、Sn 含量增加而增大,压缩率在 Zn、Sn 含量均为 2% 时达到最高,这是由于 Mg_2Sn 及 MgZn 相变得细小且均匀分布在晶界,提高了合金的塑性。

关键词 Mg-Zn-Sn 合金;铸态组织;力学性能

中图分类号 TG146.22;TG113.25

文献标志码 A

DOI:10.15980/j.tzzz.2022.06.018

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Microstructure and Mechanical Properties of Mg-Zn-Sn Casting Alloys

Yang Jue^{1,2}, Hu Jian², Zhang Shichang^{1,2}

(1.Key Laboratory for Ferrous Metallurgy and Resources Utilization of Ministry of Education, Wuhan University of Science and Technology; 2.School of Materials and Metallurgy, Wuhan University of Science and Technology)

Abstract: Mg-Zn-Sn alloys with different contents of Zn and Sn were prepared by metal mold, and the as-cast structure and mechanical properties of the alloys were investigated. The results show that the morphology of the grains is changed from columnar to equiaxed and the equiaxed grain size as well as the secondary dendrite spacing is decreased as the element content increases when the total mass fraction of Zn and Sn is less than or equal to 6% due to the value of G_{RF} (Growth restriction factor) increases. However the amount of second-phase MgZn and/or Mg_2Sn is increased with Zn and Sn content increasing. The yield strength and compressive strength of the alloy are increased with the content of Zn and Sn increasing, however the compressive rate of the alloys reaches the highest values at 2% Zn and 2% Sn, which is attributed to the finer and uniform distribution of Mg_2Sn and MgZn phases at the grain boundaries, thus improving the plasticity.

Key Words: Mg-Zn-Sn Alloys, As-cast Microstructure, Mechanical Properties

收稿日期:2021-08-10;**修改稿收到日期:**2021-09-26

第一作者简介:杨珏,男,1997 年出生,硕士研究生,武汉(430081),E-mail:1048621969@qq.com

通信作者:张诗昌,男,1962 年出生,教授,武汉(430081),E-mail:s.c.hust@163.com

引用格式:杨珏,胡剑,张诗昌. Mg-Zn-Sn 铸造合金的组织及力学性能[J]. 特种铸造及有色合金,2022,42(6):767-770.

YANG J, HU J, ZHANG S C. Microstructure and mechanical properties of Mg-Zn-Sn casting alloys[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2022, 42(6):767-770.

- [19] 何进,晏敏胜,杨丽景,等. S32750 超级双相不锈钢在 NaCl 溶液中的临界点蚀温度及电化学腐蚀机理[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2015, 35(2): 106-112.
- [20] REBECCA A, WHEELING, JOHN C. Characterization of weld metal microstructure in a Ni-30Cr alloy with additions of niobium and molybdenum[J]. Materials Characterization, 2016, 115: 97-103.
- [21] ANTONIO J, RAMIREZ, JEFFREY W, et al. Improving the ductility-dip cracking resistance of Ni-base alloys[J]. Journal of Materials Processing Tech., 2006, 179(1): 212-218.
- [22] 石林,郑志军,高岩. 不锈钢的点蚀机理及研究方法[J]. 材料导报, 2015, 29(23): 79-85.
- [23] 向红亮,吕文潇,郑开魁. 退火温度对 NSSC 2120 双相不锈钢组织和性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2021, 41(8): 1 010-1 016.
- [24] 冯志慧. 经济型双相不锈钢 2101 热塑性研究[D]. 北京:北京科技大学, 2018.
- [25] 杨吉春,刘香军,周莉,等. 氮对 2205 双相不锈钢在 NaCl 溶液中耐腐蚀性能的影响[J]. 金属热处理, 2019, 44(5): 6-11.
- [26] 刘静,罗兴宏,胡小强,等. Ti 和 Nb 微合金化对超纯 11%Cr 铁素体不锈钢组织的影响[J]. 金属学报, 2011, 47(6): 686-694.
- [27] BHATTACHARYA A, SINGH P M. Role of microstructure on the corrosion susceptibility of UNS S32101 duplex stainless steel[J]. Corrosion, 2008, 64(6): 532-540.
- [28] 郭一二,梁平,迟嘉鹏,等. 高氮奥氏体不锈钢的临界点蚀温度及 Cl⁻ 浓度对其的影响[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2018, 30(6): 625-629.
- [29] 黄恩泽,杜开平,王旭,等. Nb 对双相不锈钢激光熔覆组织及性能的影响研究[J]. 热喷涂技术, 2020, 12(1): 19-24.

(编辑:刘卫)

Zn、Sn 在提高镁合金力学性能方面具有独特的优势^[1~4]。首先,Zn、Sn 在镁合金中的固溶度很大,可以形成固溶强化;其次,Zn、Sn 与 Mg 可以形成第二相组织 MgZn 及 Mg₂Sn 等,起到第二相强化的效果。此外,Zn、Sn 之间不会形成第二相组织,因而可以通过调节 Zn、Sn 含量改善第二相的数量及分布形态,获得较好的力学性能。目前,Mg-Zn-Sn 系镁合金得到了广泛关注,其研究主要集中于合金的加工工艺、热处理和合金化等方面^[5~7]。尽管如此,实用化 Mg-Zn-Sn 合金的开发仍存在很大挑战。因此,深入研究 Zn、Sn 在镁合金中的作用,对于进一步优化 Mg-Zn-Sn 合金成分,提高其力学性能并使之实用化具有积极意义。

本课题通过金属型铸造制备了不同 Zn、Sn 含量的 Mg-Zn-Sn 合金,研究 Zn、Sn 对铸态组织包括等轴晶粒尺寸、二次枝晶间距以及第二相体积分数的影响,并探讨其机理以及铸造组织对合金力学性能的影响,旨在为其实用化提供参考。

1 试验过程

试验原材料(质量分数,下同)为 99.9% 的 Mg 锭、Zn 粒和 Sn 粒,Mg-Zn-Sn 合金的名义成分见表 1。光谱分析(ICP3000)检测到合金各元素实际成分比名义成分总减少约 5%,即熔炼时产生损耗。在金属型中

表 1 Mg-Zn-Sn 合金的名义成分			
Tab.1	Nominal compositions of Mg-Zn-Sn alloys		%
合金	w_B		Mg
	Zn	Sn	
Mg-2Zn	2	0	余量
Mg-4Zn	4	0	余量
Mg-6Zn	6	0	余量
Mg-2Sn	0	2	余量
Mg-4Sn	0	4	余量
Mg-6Sn	0	6	余量
Mg-1Zn-1Sn	1	1	余量
Mg-2Zn-2Sn	2	2	余量
Mg-3Zn-3Sn	3	3	余量

(铸型内腔尺寸为 $\phi 50\text{ mm} \times 200\text{ mm}$)铸造镁合金试样,腐蚀剂为 5 g 苦味酸+5 mL 的冰乙酸+75 mL 的无水乙醇+15 mL 的蒸馏水,在 Axio Scope A1 光学显微镜下观察合金金相组织,采用截距法测量等轴晶的平均晶粒尺寸和一次枝晶间距;用 D/2000X 射线衍射仪(XRD)进行物相成分分析;采用 JSM-6610 扫描电镜拍摄 SEM 及面扫描分析;在经过改装的 GWTA304 试验机上进行压缩试验,试样尺寸为 $\phi 8\text{ mm} \times 12\text{ mm}$,绘制应力-应变曲线,得到强度、压缩率等力学性能参数。

2 试验结果及分析

2.1 Mg-Zn-Sn 合金的铸态组织

铸态 Mg-Zn-Sn 合金的金相组织见图 1。图 2 为

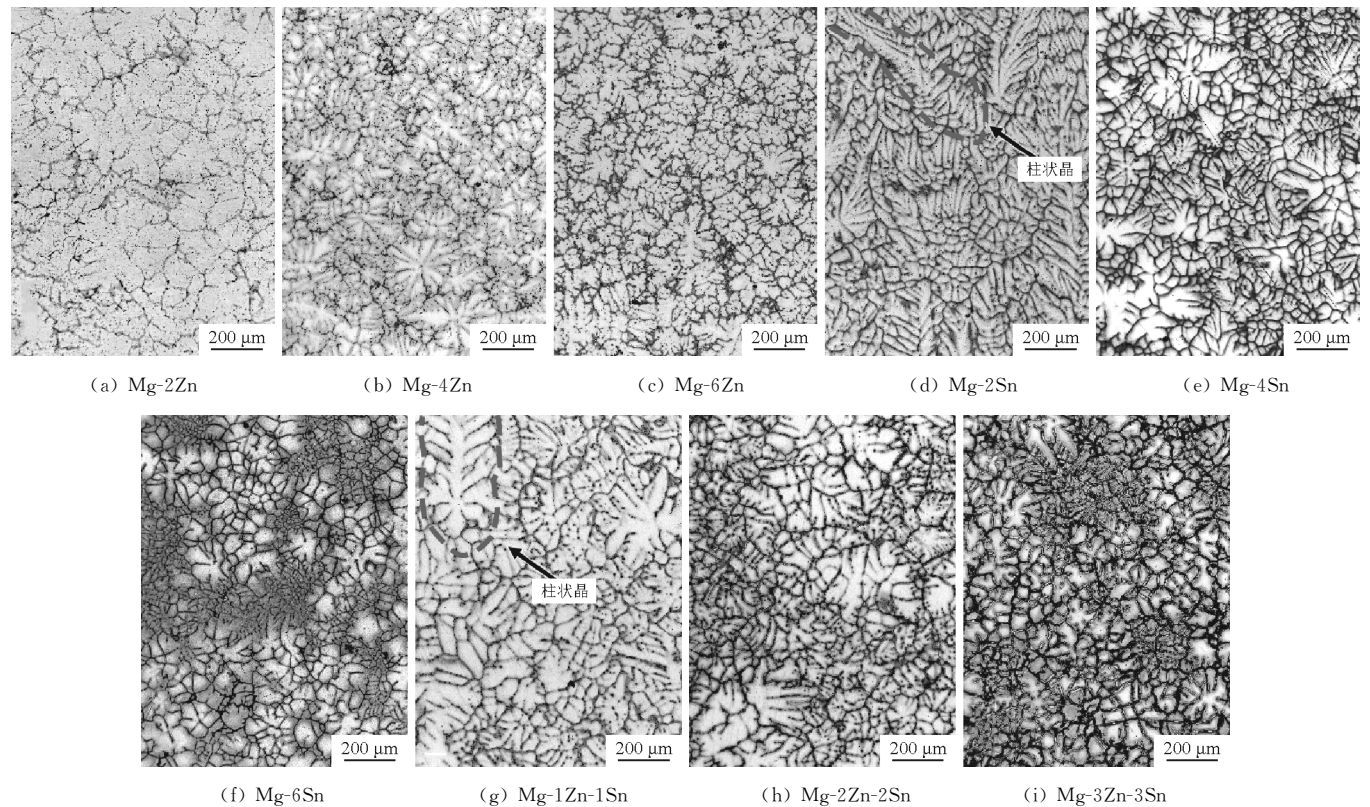


图 1 铸态 Mg-Zn-Sn 合金的金相组织

Fig.1 Metallographic structure of as-cast Mg-Zn-Sn alloys

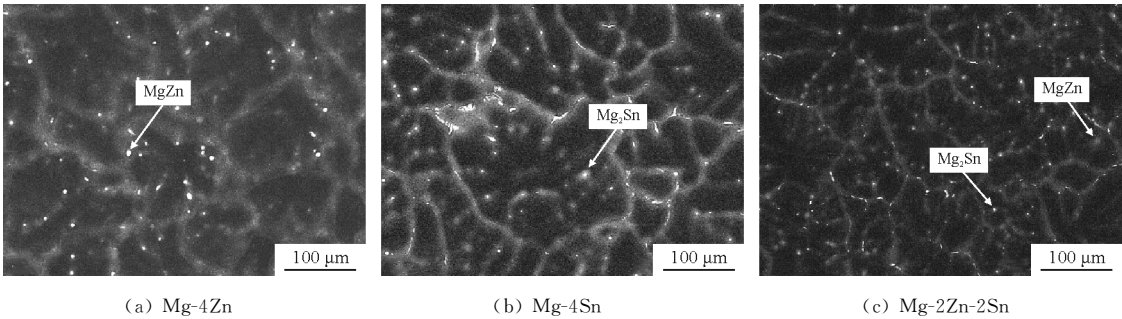


图 2 Mg-4Zn、Mg-4Sn 及 Mg-2Zn-2Sn 合金的 SEM 形貌

Fig.2 SEM morphologies of Mg-4Zn, Mg-4Sn and Mg-2Zn-2Sn alloys

Mg-4Zn、Mg-4Sn 及 Mg-2Zn-2Sn 合金的 SEM 形貌。从图 1a 可以看出，Mg-2Zn 合金的铸态组织为较粗大的 α -Mg 等轴枝晶。随着 Zn 含量增加，等轴枝晶变得细小，第二相 MgZn 数量明显增加，基本上都分布在晶界上。Mg-4Zn 合金为细小的等轴晶组织及一定量的 MgZn，见图 2a。另一方面，从图 1d 和图 1g 可以看出，Mg-2Sn 和 Mg-1Zn-1Sn 合金的铸态组织除了存在粗大的 α -Mg 等轴枝晶外，还含有少量柱状 α -Mg 枝晶。从图 2b 和图 2c 可以看出，等轴晶粒细化，第二相 Mg_2Sn 及 MgZn 数量显著增加。表 2 为铸态 Mg-Zn-Sn 合金的等轴晶粒尺寸、二次枝晶间距、第二相体积分数以及生长限制因子(G_{RF} 值)。

表 2 Mg-Zn-Sn 合金的金相组织参数及 G_{RF} 值

Tab.2 Metallographic parameters and G_{RF} values of

Mg-Zn-Sn alloys				
合金种类	等轴晶粒尺寸/ μm	二次枝晶间距/ μm	第二相体积分数/%	$G_{RF}/^{\circ}C$
Mg-2Zn	267	45	<0.3	10.62
Mg-4Zn	178	23	2.8	21.24
Mg-6Zn	133	17	3.8	31.86
Mg-2Sn	289	50	<0.3	2.94
Mg-4Sn	183	33	3.2	5.88
Mg-6Sn	139	22	4.3	8.82
Mg-1Zn-1Sn	258	40	<0.3	6.78
Mg-2Zn-2Sn	170	20	3.0	13.56
Mg-3Zn-3Sn	125	14	4.2	20.34

其中, G_{RF} 值采用下式计算得到^[8]:

$$G_{RF} = \sum m_i C_0 (k_i - 1) \quad (1)$$

式中, m_i 为第*i*组元相图中液相线的斜率, $^{\circ}C/\%$; C_0 为第*i*组元的初始浓度,%; k_i 为第*i*组元中溶质分配系数。

可以看出,随着 Zn、Sn 含量增加,等轴晶粒尺寸和二次枝晶间距减小,而第二相体积分数增加,其原因在于 Zn、Sn 提高了 Mg-Zn-Sn 合金的 G_{RF} 值,使得晶粒生长受到限制,且 Zn 对提高合金的 G_{RF} 值更为显著。Mg-Zn 合金液相线斜率 $m = -6.04^{\circ}C/\%$,溶质平衡分配系数 $k = 0.12$;Mg-Sn 合金的液相线斜率 $m = -2.41$

$^{\circ}C/\%$,溶质平衡分配系数 $k = 0.39$ 。代入式(1)中,可计算得到 Mg-Zn-Sn 合金的 G_{RF} 值,见表 2。

图 3 为 Mg-Zn-Sn 合金的 XRD 分析图谱。可见组织中的第二相为 Mg_2Sn 和 MgZn。图 4 为 Mg-2Zn-2Sn 合金的 SEM 面扫描图,可以基本判断出 Mg_2Sn 和 MgZn 在 Mg-Zn-Sn 合金中的分布状态。其中亮色的组织为 Mg_2Sn ,较暗色的组织为 MgZn,它们中的绝大部分均分布在晶界上,有时这两种组织重叠在一起,难以区分。

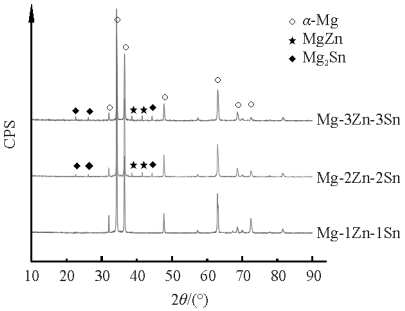


图 3 Mg-Zn-Sn 合金的 XRD 图谱

Fig.3 XRD patterns of Mg-Zn-Sn alloys

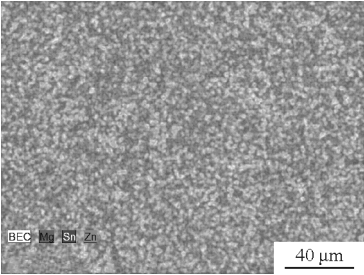


图 4 Mg-2Zn-2Sn 合金 SEM 面扫描图

Fig.4 SEM surface scanning of Mg-2Zn-2Sn alloys

2.2 Mg-Zn-Sn 合金的力学性能

表 3 为铸态 Mg-Zn-Sn 合金在室温(23 $^{\circ}C$)、应变速率为 $10^{-3} s^{-1}$ 下的压缩力学性能。可以看出,添加 Zn、Sn 均能提高 Mg 合金的屈服强度、压缩强度。其中,Mg-2Zn-2Sn 合金的压缩率最大,达到 27%,其次为 Mg-4Zn 合金。比较含量相同的 Mg-Zn 及 Mg-Sn 合金,可以发现,Mg-Zn 合金屈服强度、压缩强度以及压

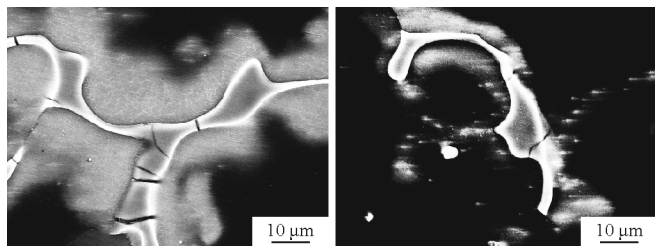
缩率均大于 Mg-Sn 合金,说明 Zn 比 Sn 对于提高镁合金的强度和塑性更有效。但当加入 Zn、Sn 两种合金元素时,尽管元素总量相同,但 Mg-Zn-Sn 合金的压缩率要高于单独加入 Zn 或 Sn 的合金,表明 Zn、Sn 协同作用可以提高 Mg-Zn-Sn 合金的塑性。

表 3 室温下铸态 Mg-Zn-Sn 合金的压缩力学性能

Tab.3 Compressive mechanical properties of as-cast Mg-Zn-Sn alloys at room temperature

合金种类	屈服强度/MPa	压缩强度/MPa	压缩率/%
Mg-2Zn	188	243	22
Mg-4Zn	207	312	24
Mg-6Zn	225	325	22
Mg-2Sn	187	216	16
Mg-4Sn	215	255	18
Mg-6Sn	230	269	15
Mg-1Zn-1Sn	190	241	23
Mg-2Zn-2Sn	208	291	27
Mg-3Zn-3Sn	224	312	21

Mg-Zn-Sn 合金的强度和塑性随 Zn、Sn 含量的变化趋势与合金的铸态组织包括晶粒尺寸、第二相数量以及非平衡共晶相的形态与分布等因素有关。由表 2 可知,随着 Zn、Sn 含量增加,铸态合金的晶粒尺寸及二次枝晶间距减小,根据霍尔-佩奇定律^[9],晶粒尺寸越小,强度越高,同样地,二次枝晶间距越细小,强度也越高。但 Zn、Sn 含量达到一定数值后,第二相数量明显增加,第二相的尺寸随之增大。当大块的第二相分布在晶界时,容易在晶界处引起应力集中,成为裂纹源,压缩时裂纹最先在第二相处萌生,进而快速扩展,使合金的塑性降低。图 5 为 Mg-6Zn 和 Mg-6Sn 合金压缩后 MgZn 和Mg₂Sn相放大后的图像。可以看出,MgZn 相和 Mg₂Sn 相都出现了微裂纹,因此,与 Mg-4Zn 和 Mg-4Sn 合金比较,Mg-6Zn 和 Mg-6Sn 合金的压缩率明显降低。当 Zn、Sn 含量都为 2%时,Mg-2Zn-2Sn 合金中的 Mg₂Sn 及 MgZn 相细小并均匀地分布在晶界及晶内,因此提高了塑性。



(a) Mg-6Zn 合金 (b) Mg-6Sn 合金

图 5 铸态 Mg-6Zn 和 Mg-6Sn 合金室温压缩后第二相形貌
Fig.5 Second phase morphologies of as-cast Mg-6Zn and Mg-6Sn alloys deformed at room temperature(SEM)

3 结 论

(1)在所研究的 Zn、Sn 含量范围内,随着 Sn、Zn 含量增加,Mg-Zn-Sn 合金的组织由柱状晶向等轴晶转变,晶粒组织细化,第二相数量增加,这与生长限制因子增大有关。

(2)Mg-Zn-Sn 合金强度随 Zn、Sn 含量的增加而增大,但其压缩率在 Zn、Sn 含量均为 2%时为最大,这与第二相 Mg₂Sn 及 MgZn 的细化及在晶界上均匀分布有关。

参 考 文 献

- [1] SASAKI T T, JU J D, HONOA K, et al. Heat-treatable Mg-Sn-Zn wrought alloy[J]. Scripta Materialia, 2009, 61: 80-83.
- [2] 张丁非,齐福刚,赵霞兵,等. Mg-Zn 系高强度镁合金的研究进展[J]. 重庆大学学报, 2010, 33(11): 53-61.
- [3] 胡剑,徐烁,杨珏,等. 金属型铸造 Mg-Zn-Sn 合金的非平衡组织及力学性能[J]. 特种铸造及有色合金, 2021, 41(1): 114-118.
- [4] 徐烁. Zn/Sn 比对 Mg-Zn-Sn 合金组织及力学性能影响的研究[D]. 武汉:武汉科技大学,2020.
- [5] HU T, XIAO W L, WANG F, et al. Improving tensile properties of Mg-Sn-Zn magnesium alloy sheets using pre-tension and ageing treatment[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2018,735: 1 494-1 504.
- [6] KIM S H, LEE J U, KIM Y J, et al. Controlling the microstructure and improving the tensile properties of extruded Mg-Sn-Zn alloy through Al addition[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2018, 751: 1-11.
- [7] ZHANG Y, CHEN X Y, LU Y L, et al. Microstructure and mechanical properties of as-extruded Mg-Sn-Zn-Ca alloy with different extrusion ratios[J]. Trans. Nonferrous Met. Soc. China, 2018, 28 (11): 2 190-2 198.
- [8] LI S S, TANG B, ZENG D B. Effects and mechanism of Ca on refinement of AZ91D alloy[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2007, 437(1-2): 317-321.
- [9] 崔忠圻,覃耀春. 金属学与热处理[M].北京:机械工业出版社, 2007.

(编辑:张正贺)

欢迎使用在线稿件处理系统

投稿、查稿、审稿

敬请登录 www.special-cast.com